

学校编码: 10384
学号: 21620100153880

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦门大学

博士学位论文

镉-芘胁迫下秋茄的生理生态学应答及镉的迁移 转化特征

**Ecophysiological Responses in *Kandelia Obovata* (S., L.) Yong and
Migration and Transformation of Cadmium under Cadmium and
Pyrene Combined Stress**

汪文云

指导教师姓名: 严重玲 教授

专业名称: 生态学

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	i
第一章 文献综述	1
1.1 引 言.....	1
1.2 复合污染概念与类型	1
1.3 复合污染物相互作用的机理	2
1.4 重金属-多环芳烃（PAHs）复合污染现状及其研究进展	3
1.4.1 重金属和 PAHs 对植物生长的影响	3
1.4.1.1 重金属对植物生长的影响.....	3
1.4.1.2 PAHs 对植物生长的影响	5
1.4.2 重金属和 PAHs 污染下植物生理生态响应	7
1.4.2.1 根系分泌物的响应.....	7
1.4.2.2 酚类化合物的响应.....	8
1.4.2.3 植物解剖结构的响应.....	9
1.4.3 重金属- PAHs 复合污染现状	10
1.4.4 重金属- PAHs 复合污染对植物的效应研究	11
1.4.5 PAHs 对重金属在植物体内迁移转化的影响	11
1.4.6 重金属对 PAHs 降解的影响	12
1.5 红树林生态系统重金属- PAHs 复合污染现状及其研究进展	13
1.5.1 红树林生态系统重金属污染现状.....	13
1.5.2 红树植物重金属耐受性机制.....	14
1.5.3 红树林生态系统 PAHs 污染现状及研究进展	15
1.5.4 红树林生态系统复合污染研究现状.....	16
第二章 选题依据、研究意义及研究内容	18
2.1 选题依据	18
2.2 研究意义	19
2.3 研究内容	19
2.4 技术路线	21

第三章 材料与amp;方法	22
3.1 土培供试植物	22
3.2 实验胁迫与设计	22
3.2.1 土培实验胁迫与设计	22
3.2.2 根系分泌物收集	24
3.3 试剂与仪器	24
3.3.1 主要试剂	24
3.3.2 主要仪器	25
3.4 测定方法	26
3.4.1 样品采集	26
3.4.2 沉积物理化指标的测定	26
3.4.3 根系活力的测定	26
3.4.4 根系分泌物测定	27
3.4.4.1 低分子量有机物的测定	27
3.4.4.2 酚酸的测定	27
3.4.4.3 类黄酮的测定	27
3.4.5 酚类化合物测定	27
3.4.5.1 总酚和单宁	27
3.4.5.2 缩合单宁	28
3.4.6 秋茄根尖和叶片结构测定方法	28
3.4.7 Cd 不同形态	28
3.4.8 铁膜提取	29
3.4.9 根尖区域化 Cd 的测定	29
3.4.9.1 根尖质外体和共质体组分 Cd 的提取	29
3.4.9.2 细胞壁不同结合态和残渣中 Cd 的提取	30
3.4.10 秋茄 Cd 含量的测定	30
3.4.11 Pyr 的测定	30
3.4.11.1 Pyr 的萃取	30
3.4.11.2 分离纯化	30
3.4.12 沉积物微生物数量	31

3.5 统计分析	32
第四章 结果与讨论	33
4.1 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄生理生态学应答	33
4.1.1 秋茄生物量	33
4.1.2 秋茄根系生长状况	34
4.1.3 根系活力	36
4.1.4 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗根系分泌物	37
4.1.4.1 秋茄幼苗根系分泌物低分子量有机酸	37
4.1.4.2 秋茄幼苗根系分泌物酚酸	39
4.1.4.3 秋茄幼苗根系分泌物类黄酮	43
4.1.5 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄酚类化合物的响应	45
4.1.5.1 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄体内总酚的响应	45
4.1.5.2 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄体内单宁的响应	46
4.1.5.3 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄体内缩合单宁的响应	47
4.1.6 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗解剖结构的响应	48
4.1.6.1 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗根解剖结构的响应	49
4.1.6.2 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗叶片结构的响应	53
4.2 Pyr 对 Cd 胁迫下 Cd 迁移转化特征的影响	58
4.2.1 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄根际非根际沉积物有机质和 pH 的影响	58
4.2.2 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄根际非根际沉积物 Cd 形态的影响	59
4.2.3 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄根表铁膜 Fe 和 Cd 含量的影响	61
4.2.4 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄幼苗根尖 Cd 区域化分布的影响	62
4.2.4.1 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄幼苗根尖质外体汁液中 Cd 含量的影响	62
4.2.4.2 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄幼苗根尖细胞壁 Cd 含量的影响	63
4.2.4.3 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄幼苗根尖共质体组分中 Cd 含量的影响	66
4.2.4.4 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄幼苗根尖 Cd 区域化分布比例的影响	67
4.2.5 Pyr 对 Cd 胁迫下植物体内 Cd 累积分布的影响	68
4.3 Cd 对 Pyr 胁迫下 Pyr 降解的影响	70

4.3.1Cd 对 Pyr 胁迫下秋茄根际和非根际沉积物微生物数量的影响	70
4.3.2Cd 对 Pyr 胁迫下秋茄根际非根际沉积物 Pyr 降解的影响.....	71
4.4 相关性分析	73
4.4.1 耐性指数与植物体内 Cd 的相关性.....	73
4.4.2 秋茄根系活力与植物体内 Cd 的相关性.....	74
4.4.3 秋茄酚类化合物含量与秋茄体内 Cd 含量的相关性.....	74
4.4.4 沉积物 pH 和总有机质与 Cd 形态的相关性.....	76
4.4.5 秋茄根表铁膜 Fe 含量与铁膜中 Cd 及秋茄体内 Cd 含量的相关性.....	77
4.4.6 根表铁膜 Fe 含量与根尖 Cd 区域化的相关性.....	77
4.4.7 根尖 Cd 区域化与地上部 Cd 含量的相关性	78
4.4.9 根系活力与根际沉积物 Pyr 残留量的相关性.....	79
4.4.10 根际沉积物 Pyr 移除率与秋茄体内 Cd 含量的相关性.....	80
4.4.11 根际沉积物微生物数量与秋茄体内 Cd 含量的相关性	81
4.4.12 沉积物微生物数量和 Pyr 残留量的相关性.....	81
4.5 讨 论.....	82
4.5.1 秋茄生物量.....	82
4.5.2 根系活力.....	83
4.5.3 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗根系分泌物	84
4.5.3.1 秋茄幼苗根系分泌物低分子量有机酸.....	84
4.5.3.2 秋茄幼苗根系分泌酚酸.....	85
4.5.3.3 秋茄幼苗根系分泌类黄酮.....	86
4.5.4 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄酚类化合物的响应	88
4.5.5 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄幼苗解剖结构的响应	89
4.5.6 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄根际非根际沉积物有机质和 pH 的影响	92
4.5.7 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄根际非根际沉积物 Cd 形态的影响.....	93
4.5.8 Pyr 对 Cd 胁迫下秋茄下根表铁膜 Fe 和 Cd 含量的影响.....	94
4.5.9Pyr 对 Cd 胁迫下胁迫下秋茄幼苗根尖 Cd 区域化分布的影响.....	96
4.5.10 Pyr 对 Cd 胁迫下植物体内 Cd 累积分布的影响.....	99
4.5.11 Cd 对 Pyr 胁迫下秋茄根际和非根际沉积物微生物数量的影响 ..	101
4.5.12 Cd 对 Pyr 胁迫下秋茄根际非根际沉积物 Pyr 降解的影响.....	103

第五章 结论与展望	106
5.1 主要结论	106
5.2 研究特色与创新	108
5.3 不足之处与展望	108
参 考 文 献	110
版图一 不同胁迫秋茄根生长情况	129
版图二 不同胁迫秋茄根横切面解剖图	132
版图三 不同胁迫秋茄叶片横切面解剖图	134
攻读博士学位期间相关的学术论文	135
致 谢	136

Content

Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	i
Chapter 1 Literature review	1
1.1 Introsuction	1
1.2 Compound contamination concept and type	1
1.3 The affect mechanism of compound contamination	2
1.4 Present situation and research progress of heavy metal-PAHs co-contamination	3
1.4.1 Effects of heavy metal-PAHs co-contamination on plant growth.....	3
1.4.1.1 Effects of heavy metal on plant growth	3
1.4.1.2 Effects of PAHs on plant growth	5
1.4.2 Ecophysiological responses of plant under heavy metal-PAHs co-contamination.....	7
1.4.2.1 The responses of root exudates	7
1.4.2.2 The responses of phenolic compounds	8
1.4.2.3 The responses of anatomical structures	9
1.4.3 Present situation of heavy metal -PAHs co-contamination.....	10
1.4.4 Research of the effect on plant of heavy metal-PAHs co-contamination .	
.....	11
1.4.5 Effects on uptake and transfer of heavy metals in plants by PAHs	11
1.4.6 The effects of heavy metals on PAHs degradation	12
1.5 Heavy metals-PAHs co-contamination present situation and research progress of mangrove ecosystem	13
1.5.1 Heavy metal pollution status of mangrove ecosystem.....	13
1.5.2 Tolerance mechanism of mangrove plant heavy metal	14
1.5.3 Present situation and research progress of PAHs in mangrove ecosystem	
.....	15
1.5.4 Co-contamination research progress of mangrove ecosystem.....	16
Chapter 2 Aim and significance of the study	18
2.1 Project basis	18
2.2 Research significance	19
2.3 Research content	19

2.4 The technical scheme and roadmap	21
Chapter 3 Materials and methods	22
3.1 Experimental plants.....	22
3.2 The experiment treatment and design	22
3.3 Regants and Instruments	24
3.4 Analytical methods.....	26
3.5 Statistical analysis	32
Chapter 4 Results and discussion.....	33
4.1 The effects of Cd and Pyr combined stress on <i>Kandelia obovata</i> seedling growth	33
4.1.1 Biomass of <i>K.obovata</i>	33
4.1.2 Root growth conditions of <i>K.obovat</i>	34
4.1.3 Root activity	36
4.1.4 Root exudates of <i>K.obovata</i> under Cd and Pyr co-stress.....	37
4.1.4.1 Root exudates -LMWOA of <i>K.obovata</i> seedling.....	37
4.1.4.2 Root exudates -phenolic acid of <i>K.obovata</i> seedling.....	39
4.1.4.3 Root exudates -flavonoid of <i>K.obovata</i> seedlin	43
4.1.5 The response of the phenolic compounds under Cd and Pyr co-stress.....	45
4.1.5.1 The response of total phenolic under Cd and Pyr co-stress	45
4.1.5.2 The response of tannin under Cd and Pyr co-stress	46
4.1.5.3 The response of condensed tannin under Cd and Pyr co-stress ..	47
4.1.6 The response of anatomical structure of <i>K.obovata</i> under Cd and Pyr co-stres	48
4.1.6.1 The response of root anatomical structure of <i>K.obovata</i> seedling	49
4.1.6.2 The response of leaf anatomical structure of <i>K.obovata</i>	53
4.2 Effects of Pyr on Cd migration and transformation treated with Cd	58
4.2.1 Effects of Pyr on the changes of total organic matter and pH in rhizosphere and non-rhizosphere sedimentstreated with Cd	58
4.2.2 Effects of Pyr on Cd speciation changes in rhizosphere and non-rhizosphere sediments treated with Cd	59
4.2.3 Effects of Pyr on the iron plaque on root surface of <i>K.obovata</i> treated with Cd.....	61

4.2.4 Effects of Pyr on Cd regional distribution in root of <i>K.obovata</i> seedling treated with Cd.....	62
4.2.4.1 Effects of Pyr on Cd concentrations in apoplastic sap of the root tips of <i>K. obovata</i> treated with Cd.....	62
4.2.4.2 Effects of Pyr on Cd concentrations in cell wall of the root tips of <i>K. obovata</i> treated with Cd	63
4.2.4.3 Effects of Pyr on Cd concentrations in symplastic of the root tips of <i>K. obovata</i> treated with Cd	66
4.2.1.4 Effects of Pyr on the distribution ratio of Cd compartmentation in the root tips of <i>K. obovata</i> treated with Cd....	67
4.2.5 Effects of Pyr on the accumulation of Cd in the plant treated with Cd	68
4.3 Effects of Cd on Pyr removal treated with Pyr	70
4.3.1 Effects of Cd on total number of microorganisms in the rhizosphere and non-rhizosphere sediment treated with Pyr.....	70
4.3.2 Effects of Cd on the degradation of Pyr in rhizosphere and non-rhizosphere of <i>K. obovata</i> treated with Pyr	72
4.4 Correlation analysis	73
4.5 Discussion.....	82
Chapter 5 Conclusion and prospect	106
5.1 Main conclusions.....	106
5.2 Innovation of the study.....	108
5.3 Disadvantage and prospect	108
References.....	110
Additional figure 1 Root growth of <i>K.obovata</i> seedling under Cd and Pyr co-stress	129
Additional figure 2 Root cross sectional anatomy of <i>K.obovata</i> seedling under Cd and Pyr co-stress	132
Additional figure 3 Leaf cross sectional anatomy of <i>K.obovata</i> seedling under Cd and Pyr co-stress	134
Published papers during Ph.D	135
Acknowledgements.....	136

摘 要

红树林生态系统对维护河口和海滨生态平衡具有重要意义。近年来,大量污染物被排放到红树林湿地生态系统中,其中重金属和多环芳烃(PAHs)尤为明显。重金属和 PAHs 具有较强的“三致”毒性及持久性而倍受关注。本文通过盆栽实验探讨镉(Cd)与芘(Pyr)复合污染对红树植物生长的影响以及红树植物生理和解剖结构应答机制、Pyr 对 Cd 在沉积物-植物根表-植物体内的迁移行为的影响、Cd 对 Pyr 降解的影响,旨在丰富红树林湿地重金属-有机污染物复合污染的研究,为科学评价复合污染背景下环境污染物迁移转化的行为及红树林湿地保护提供科学理论依据。主要研究结论如下:

1、秋茄幼苗生长受 Cd 和 Pyr 的抑制, Cd 对秋茄生长的抑制作用大于 Pyr。低浓度 Pyr (2 mg kg^{-1}) 单一胁迫下秋茄作出了应激性,生物量有所增加,而中高浓度 Pyr (10 、 50 mg kg^{-1}) 单一胁迫对秋茄生长显示出一定的毒性因而抑制了秋茄的生长,生物量随着胁迫浓度的增大呈下降趋势。高浓度 Cd (40 mg kg^{-1}) 胁迫下施加 Pyr 显著抑制了秋茄生长,生物量随着 Pyr 浓度的增大呈下降的趋势,至 Cd40Pyr50 胁迫组总生物量较对照组减少了 56.24%,表明高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫加剧了对秋茄生长的抑制效应。在根系生物量中,须根由于与沉积物接触面积大,因而受 Cd 和 Pyr 影响较主根和呼吸根的大,导致 Cd 和 Pyr 单一及复合胁迫下须根干重占根系干重的比例均有所降低。Cd 和 Pyr 单一及复合胁迫对根系活力的影响均表现为低浓度下刺激、高浓度下抑制的效应。Cd5Pyr2 胁迫组根系活力比对照组增加了 41.54%,而 Cd40Pyr50 胁迫组根系活力比对照组降低了 66.60%,表明高浓度复合胁迫对根系活力显示出较强的抑制效应。秋茄耐性指数与根 Cd 含量、地上部 Cd 含量均呈显著负相关;耐性指数与根际沉积物 Pyr 降解率呈显著正相关,表明秋茄对 Cd 和 Pyr 具有较强的耐受性,在复合污染环境阻止大量 Cd 进入秋茄体内的同时,促进了根际 Pyr 的降解。根系活力与秋茄根 Cd 含量、与地上部 Cd 含量、根际沉积物 Pyr 残留量均呈显著负相关,表明秋茄根系活力越强,对 Cd 的耐性越强,对根际 Pyr 的降解能力亦越强。

2、秋茄根系分泌的低分子量有机酸种类和含量因 Cd 和 Pyr 胁迫浓度不同而呈现差异性。Cd 和 Pyr 复合胁迫秋茄根系分泌物低分子量有机酸主要成分为草酸、乙酸、酒石酸、柠檬酸、琥珀酸和 L-苹果酸,其中草酸含量显著高于其

它种类，其次是乙酸含量，这些低分子有机酸的大量分泌，对于秋茄在很大程度上免受 Cd 和 Pyr 的毒害是至关重要的。Cd 和 Pyr 胁迫促进了秋茄根系分泌物酚酸的大量分泌，高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫由于对秋茄的生长具有一定的毒性促进酚酸分泌的作用有所降低；高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫酚酸的主要成分为对羟基苯甲酸，其次是绿原酸、咖啡酸和阿魏酸。酚酸总量随着 Cd 和 Pyr 胁迫浓度的增大而显著增加。Cd 和 Pyr 胁迫下秋茄根系分泌物类黄酮（主要成分为表没食子儿茶素、儿茶素和表儿茶素）总量随着胁迫的浓度增加而增加，至高浓度复合胁迫下达到最大值。类黄酮大量产生不仅能清除大量的自由基，从而提高了秋茄对 Cd 和 Pyr 双重胁迫的耐受能力。

3、Cd、Pyr 单一及复合胁迫下秋茄根、茎、叶合成大量的总酚、单宁和缩合单宁，含量均随着胁迫浓度增大呈现上升趋势，这些酚类化合物的增加利于清除 Cd 和 Pyr 复合污染产生的大量自由基。各组织总酚、单宁和缩合单宁含量均表现出茎>叶>根。高浓度复合胁迫下根、茎和叶等的总酚、单宁和缩合单宁含量显著高于同一水平 Cd 胁迫组。根和叶的总酚、单宁及缩合单宁的含量与相同器官中 Cd 的含量均呈显著正相关，表明总酚、单宁和缩合单宁参与秋茄根和叶对 Cd 的螯合，增强了秋茄对 Cd 的耐性。

4、单一 Pyr 胁迫下秋茄根尖表皮、外皮层、内皮层、皮层等结构的厚度有所变薄，Cd 单一胁迫使之有所增厚；高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫下秋茄根尖表皮、外皮层、内皮层、皮层等结构的厚度有所变薄，这与高浓度 Cd 和 Pyr 影响根尖细胞分裂生长，抑制了质外体壁垒的发育有关。Pyr 和 Cd 胁迫下秋茄根尖直径和根尖中柱直径减小，高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫增强了对根尖直径和根尖中柱直径增长的抑制作用，旱生化特征加强。Pyr 和 Cd 胁迫对秋茄叶片表皮的增厚有抑制作用，Cd 的抑制作用强于 Pyr；Pyr 单一胁迫下皮层、叶片栅栏组织、海绵组织、叶片等结构的厚度变化不显著；低浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫下下皮层的增厚，而高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫抑制下皮层的增厚，这源于高浓度复合胁迫加大对叶片中细胞生长和分裂的抑制，且导致生理干旱加深，使得叶片中的储水结构发生萎缩。高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫下海绵组织厚度减小，叶片通气组织受到抑制。Cd 和 Pyr 单一胁迫及二者复合胁迫下叶片均有所加厚，高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫由于叶片叶绿体结构易受破坏，且叶片旱生化特征加强，因而加大对秋茄叶片光合作用和蒸腾作用的抑制。

5、复合污染环境中高浓度 Pyr 对 Cd 迁移转化的主要影响因素具有重要影响。高浓度 Pyr、Cd 单一胁迫下，根际和非根际总有机质含量显著增加，根际总有机质含量大于非根际；Cd 胁迫下施加高浓度 Pyr 沉积物总有机质含量大于同一水平 Cd 单一胁迫。Pyr 和 Cd 胁迫根际和非根际 pH 增大；Cd 胁迫下施加 Pyr pH 增大。Cd 单一胁迫和高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫非根际沉积物 Cd 弱酸提取态(生物有效性最强)含量明显高于根际沉积物。Cd 胁迫下施加高浓度 Pyr 根际和非根际沉积物总 Cd 生物有效态比例比同一水平 Cd 单一胁迫有所增加，表明复合污染环境中高浓度 Pyr 对 Cd 的迁移具有重要影响。低浓度 Pyr 致使 Cd 胁迫下秋茄根表铁膜 Fe 和 Cd 含量有所增大，而中高浓度 Pyr 致使铁膜 Fe 和 Cd 含量有所降低，这与中高浓度 Pyr 通过抑制秋茄生长影响根表泌氧量从而影响根表铁膜形成有关。Cd 和 Pyr 胁迫下秋茄根表铁膜 Fe 含量与铁膜中 Cd 含量、根中 Cd 含量、地上部 Cd 含量均呈显著正相关，可见在红树林复合污染环境中，红树植物根表铁膜对 Cd 的迁移转化具有一定的影响。

6、Pyr 和 Cd 单一及复合胁迫下秋茄根尖 Cd 主要分布于质外体，且绝大部分结合在细胞壁上。复合胁迫组中，高浓度 Pyr 显著增加了根尖质外体汁液、细胞壁和共质体 Cd 含量，高浓度 Pyr 抑制质外体壁发育，促进了 Cd 的吸收。Cd 胁迫下施加 Pyr 在一定程度上降低了细胞壁结合 Cd 的比例，使质外体汁液和共质体组分 Cd 比例升高，导致秋茄根系 Cd 移动性增大，增加 Cd 向地上部分的转移，促使更多的 Cd 进入原生质体，对秋茄的生长造成更大的危害。高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫根细胞壁可交换态 Cd 含量比例显著增加，难溶态 Cd 含量的比例降低，高浓度 Cd 和 Pyr 影响细胞壁结构发育而降低细胞壁结合性能有关。Cd 单一胁迫及 Cd 和 Pyr 复合胁迫各组织 Cd 含量及 Cd 富集系数随着 Cd 胁迫浓度的增大而增大，根为主要累积 Cd 的组织。Cd40Pyr10 和 Cd40Pyr50 胁迫组根 Cd 含量分别比 Cd40 单一胁迫增加了 33.69%和 139.06%；高浓度 Pyr 促进更多的 Cd 进入秋茄体内，增加了 Cd 对秋茄的毒性。根尖质外体汁液 Cd 含量与地上部 Cd 含量呈显著正相关，根尖 Cd 移动性的增大促进更多 Cd 转移至地上部分。根表铁膜 Fe 含量与根尖质外体汁液、根尖质外体、根尖共质体 Cd 含量均呈显著正相关，表明铁膜的形成参与了根尖 Cd 区域化分布的变化。

7、Cd 和 Pyr 单一及复合胁迫下根际沉积物微生物数量明显大于非根际；低浓度 Pyr 对微生物生长具有促进作用，而高浓度 Pyr 对微生物生长具有抑制作用；

随着 Cd 浓度的增大微生物数量显著降低；中低浓度 Pyr 能缓解 Cd 对根际微生物的毒性，高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫加大对微生物的毒性，抑制微生物的生长。Pyr 单一胁迫和 Cd 和 Pyr 复合胁迫根际沉积物 Pyr 移除率明显高于非根际，低浓度 Pyr 胁迫组 Pyr 移除率大于高浓度 Pyr 胁迫组；Cd 和 Pyr 复合胁迫根际和非根际 Pyr 残留量随着 Cd 胁迫浓度的增大而增大，Pyr 降解明显受到 Cd 的抑制。根际、非根际微生物数量与 Pyr 残留量均呈显著负相关，显示出微生物在 Pyr 降解的主导作用。根际微生物数量与根 Cd 含量，与地上部 Cd 含量均呈显著负相关，可推测根际微生物可能参与了秋茄对 Cd 的累积。根际沉积物 Pyr 移除率与根 Cd 含量、与地上部 Cd 含量均呈显著负相关，秋茄体内 Cd 累积量越低，根系对 Pyr 的修复效应越大，这缘于植物受重金属毒害程度越低，对有机物修复能力越大。

综上所述，秋茄幼苗生长受 Cd 和 Pyr 胁迫的抑制，高浓度 Cd 和 Pyr 复合胁迫加剧了对秋茄生长的抑制，抑制了根系的发育和活性。秋茄体内活跃的酚类代谢和低分子量有机酸、酚酸、类黄酮等根系分泌物的大量分泌对复合污染作出了积极的响应，在一定程度上缓解了复合污染双重胁迫带来的毒害。复合污染下秋茄根系和叶片早生化特征加强。Cd 胁迫下施加高浓度 Pyr 抑制了根表铁膜的形成和根尖质外体壁垒的发育，导致共质体和质外体汁液 Cd 含量比例升高，增加了 Cd 的移动性，大量 Cd 进入植物体内，加大了对秋茄幼苗的毒害。Cd 主要通过抑制沉积物微生物的生长而影响了 Pyr 的降解。在复合污染环境下，红树植物的耐性机制因污染物的种类和浓度的不同而存在着较大差异，污染物的归宿受到相互之间的影响。

关键词：镉；茳；复合污染；迁移转化；秋茄

Abstract

Mangroves play an important role in preserving the coastal ecological balance. In recent years, with the rapid urbanization and industrialization, many pollutants are discharged into mangrove ecosystems. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons are particularly common in mangrove ecosystems. The two kinds of serious pollutants with toxicity of carcinogenesis, teratogenesis and mutagenesis and with persistence in the environment, have been drawn more and more attention recently. Because organic pollutants and heavy metals have great differences in the nature of the research resulting compound pollution effects between organic pollutants and heavy metals and mechanisms, there are still more difficult, research in this area seems relatively weak, this research on mangroves is even more rarely reported. The purposes of this study by greenhouse pot experiments as follows: (1) to explore the Cd and Pyr complex toxic stress on mangroves and the resistance mechanism of came from mangrove plants; (2) to explore the influence of Pyr on Cd migration and transformation behavior in sediment - plant root surface-plants; (3) to explore the influence of Cd on Pyr degradation. Results of this research should provide a scientific basis for the theory of scientific evaluation on the migration and transformation behavior of pollutants under co-contamination background and protection of mangrove wetlands. Major conclusions were summarized as follows:

1. The growth of *Kandelia Obovata* seedlings was inhibited under Cd and Pyr stress, and the inhibition effect of Cd was stronger than Pyr. The growth of *K. Obovata* was promoted under low level of Pyr single (2mg kg^{-1}) stress and the biomass increased while was inhibited under middle (10 mg kg^{-1}) high level of Pyr (50 mg kg^{-1}) single stress and the biomass decreased with increasing stress concentrations. Under the presence of 40mgCdkg^{-1} applying Pyr inhibited the growth of *K. Obovata*, the biomass decreased along with the increasing applied Pyr concentrations. When compared to the control group, the total biomass decreased by 56.24% under the 40 mgCdkg^{-1} mixed with 50 mg Pyr kg^{-1} stress. These results showed that high concentrations of Cd and Pyr co-stress exacerbated the growth inhibitory effect of *K. Obovata*. The dry weight ratio of fibrous root decreased under Cd, Pyr single stress or Cd- Pyr co-stress. The root activity of *K. Obovata* was stimulated at low levels and inhibited at high Cd, Pyr single stress or Cd and Pyr

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库